

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
3. Oktober 2002 (03.10.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/078280 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H04L 27/00**

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE02/00929

(22) Internationales Anmeldedatum:
15. März 2002 (15.03.2002)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
101 15 221.3 28. März 2001 (28.03.2001) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE]; Postfach 30 02
20, 70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder; und

(75) **Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHAEFER, Wolfgang** [DE/DE]; Sensburger Ring 31, 31141 Hildesheim
(DE). **HANSEN, Christian** [DE/DE]; Marienstrasse 104,
30171 Hannover (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AU, CN, HU, ID, IN, JP,
US.

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT,
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,
NL, PT, SE, TR).

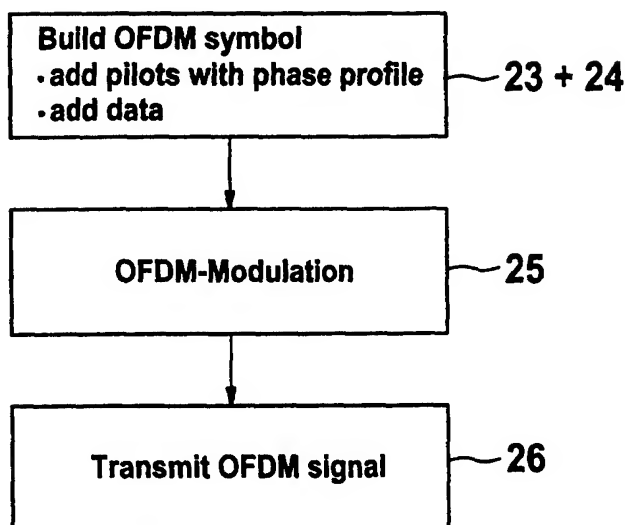
Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR FRAME AND FREQUENCY SYNCHRONIZATION OF AN OFDM SIGNAL AND METHOD FOR
TRANSMITTING AN OFDM SIGNAL

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR RAHMEN- UND FREQUENZSYNCHRONISATION EINES OFDM-SIGNALS UND
VERFAHREN ZUM SENDEN EINES OFDM-SIGNALS



(57) **Abstract:** The invention relates to a method for frame and frequency synchronization of an OFDM signal or a signal for transmitting an OFDM signal that is used to impress a pilot phase profile on pilots that are already contained in the OFDM signal for channel estimation. Said pilot phase profile is then used on the reception side for frame and frequency synchronization. The method is advantageous in that no additional transmission capacity has to be used for synchronization. The inventive method is initiated by an upstream, rough time synchronization unit that searches for the begin of the protective interval in the OFDM signal. The comparison between a stored pilot phase profile and the received subcarrier symbols is carried out by cross-correlation, the result of which is evaluated to determine the frame and frequency synchronization.

(57) **Zusammenfassung:** Es wird ein Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation eines OFDM-Signals bzw. ein Signal zum Senden eines OFDM-Signals vorgeschlagen, das dazu dient, Piloten, die in dem OFDM-Signal zur Kanalschätzung bereits enthalten sind, ein Pilotphasenprofil aufzuprägen, das dann empfangsseitig zur Rahmen-

und Frequenzsynchronisation verwendet wird. Dies hat den Vorteil, dass keine zusätzliche Übertragungskapazität für die Synchronisation verwendet werden muss. Durch eine vorgeschaltete, grobe Zeitsynchronisationseinheit, die nach dem Beginn des Schutzintervalls in dem OFDM-Signal sucht, wird das erfindungsgemäße Verfahren eingeleitet. Der Vergleich zwischen einem abgespeicherten Pilotphasenprofil und den empfangenen Subträgersymbolen wird mittels einer Kreuzkorrelation durchgeführt, deren Ergebnis dann für die Bestimmung der Rahmen- und Frequenzsynchronisation bewertet wird.



WO 02/078280 A2



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation eines
OFDM-Signals und Verfahren zum Senden eines OFDM-Signals

Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation eines OFDM-Signals bzw. einem Verfahren zum Senden eines OFDM-Signals nach der Gattung der unabhängigen Patentansprüche.

Im Rahmen eines weltweiten Konsortiums (DRM - Digital Radio Mondiale) wird ein neuer digitaler Rundfunkübertragungsstandard für den Frequenzbereich unter 30 MHz entwickelt. Als Modulationsverfahren soll hier das Mehrträgerverfahren OFDM (Orthogonaler Frequenzmultiplex) benutzt werden (genauer gesagt soll ein kohärentes OFDM-Übertragungsverfahren verwendet werden). Das OFDM-Signal besteht aus OFDM-Symbolen, die wiederum jeweils Subträgersymbole enthalten. Sendeseitig vorgegebene Subträgersymbole werden als Piloten ausgebildet, so dass empfangsseitig eine Kanalschätzung damit möglich ist. Die Piloten werden dabei in Zeit- und Frequenzrichtung auf die Subträger verteilt.

Vorteile der Erfindung

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation eines OFDM-Signals bzw. das Verfahren zum Senden eines OFDM-Signals mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche haben den Vorteil, dass die sowieso vorhandenen Piloten nun auch empfangsseitig zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation genutzt werden, indem sendeseitig den Piloten ein innerhalb eines Rahmens eindeutiges Pilotphasenprofil aufgeprägt wird. Jedes OFDM-Symbol eines Rahmens ist dann durch sein Pilotphasenprofil unterscheidbar. Damit werden die Piloten für einen zusätzlichen Zweck ausgenutzt, und es muss für die Frequenz- und Rahmensynchronisation keine zusätzliche Übertragungskapazität bereit gestellt werden.

Darüber hinaus zeichnet sich das erfindungsgemäße Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation durch eine hohe Robustheit gegenüber schlechten Ausbreitungs- und Empfangsbedingungen aus. Dies kann gesteigert werden, indem zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation mehrere (unterschiedliche) Pilotphasenprofile eines Übertragungsrahmens verwendet werden. Weiterhin ist es erfindungsgemäß möglich, die Frequenz- und Rahmensynchronisation bereits innerhalb eines Übertragungsrahmens durchzuführen. Die OFDM-Symbole sind nämlich bei DRM (Digital Radio Mondiale) in Übertragungsrahmen aufgeteilt.

Darüber hinaus ist es von Vorteil, dass durch Ausnutzung der verteilten Piloten ein großer Fangbereich für eine grobe Frequenzschätzung erreicht werden kann. Mit der Pilotphasenmetrik kann eine Frequenzablage von mehr als der halben Signalbandbreite eindeutig detektiert werden. Mit Pilotphasenmetrik wird im Folgenden eine Berechnungsvorschrift bezeichnet, mit der das

Pilotphasenprofil empfangsseitig mit den empfangenen Subträgern oder Subträgersymbolen verglichen wird. Die Begriffe Subträger und Subträgersymbole werden im folgenden als Synonyme gebraucht.

Durch die in den abhängigen Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen und Weiterbildungen sind vorteilhafte Verbesserungen der in den unabhängigen Patentansprüchen angegebenen Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation eines OFDM-Signals bzw. zum Senden von eines OFDM-Signals möglich.

Es ist des weiteren von Vorteil, dass ein Vergleich der empfangenen Subträgersymbole mit einem abgespeicherten Pilotphasenprofil erst nach einem OFDM-Demodulator (DFT-Einheit) durchgeführt wird, da auf diese Weise eine Vielzahl von Pilotsubträgern, deren Hauptaufgabe die Kanalschätzung ist, zu Synchronisationszwecken genutzt werden kann. Aus diesem Grund muss vorher das OFDM-Demodulationsfenster korrekt platziert werden, also eine grobe Zeitsynchronisation durchgeführt werden. Um eine grobe Zeitsynchronisation zu erreichen, ist es vorteilhaft mittels Autokorrelation nach dem Schutzintervall (Guard-Intervall) im empfangenen OFDM-Signal zu suchen. Mit demselben Verfahren kann auch eine Schätzung einer feinen Frequenzablage erreicht werden. Für eine korrekte Demodulation der Nutzdaten ist jedoch auch eine Bestimmung der groben Frequenzablage, also der ganzzahligen, vielfachen Subträgerabstandes und des Rahmenanfangs notwendig. Dies wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren realisiert.

Es ist von Vorteil, dass der Vergleich des empfangsseitig abgespalteten Pilotphasenprofils mit den Subträgersymbolen durch eine Kreuzkorrelation durchgeführt wird und das Ergebnis der Kreuzkorrelation für die Bestimmung der Rahmen- und Frequenzsynchronisation bewertet wird. Die Bewertung

kann beispielsweise durch ein Haupt- Nebenmaximum-Verhältnis oder durch einen Meritfaktor erfolgen.

Darüber hinaus ist es von Vorteil, dass das zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation nötige Pilotphasenprofil durch eine Pseudo- Zufallsfolge oder durch eine deterministische Funktion bestimmt wird. Diese Funktion ist dann wie auch die Pseudo- Zufallsfolge sende- und empfangsseitig bekannt.

Weiterhin ist es von Vorteil, dass die Piloten gleichmäßig in einem OFDM-Symbol verteilt werden, um so eine hohe Robustheit zu erreichen und für die Kanalschätzung eine optimale Platzierung der Piloten zu verwirklichen.

Ein weiterer Vorteil besteht in der hohen Robustheit des Rahmen- und Frequenzsynchronisationsverfahrens gegenüber Rauschstörungen. Diese Robustheit wird durch Verwendung einer Vielzahl von Pilotsubträgern bei der Berechnung der Pilotphasenmetrik erreicht.

Schließlich ist es auch von Vorteil, dass ein Sender und ein Empfänger zur Durchführung der erfindungsgemäßen Verfahren vorliegen.

Zeichnung

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert.

Es zeigt

Figur 1 ein Blockschaltbild des Gesamtübertragungssystems,
Figur 2 ein Blockschaltbild zur Pilotphasenmetrik,
Figur 3 ein Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Senden des OFDM-Signals,
Figur 4 eine Verteilung von Piloten in einem OFDM-Symbol,

Figur 5 eine Pilotphasenmetrik für verschiedene OFDM-Symbole und

Figur 6 Haupt- Nebenmaximum- Verhältniswerte für mehrere DRM-Rahmen.

Beschreibung

Auf Grund der schwierigen Wellenausbreitungsbedingungen, speziell bei der Kurzwelle, muss eine große Robustheit von den verwendeten Synchronisationsalgorithmen gefordert werden. Ermittlung und Kompensation der Frequenzablage und Auffinden des Rahmenanfangs sind notwendige Bedingungen, um den Empfang digitaler Rundfunkprogramme sicherzustellen. Wegen der geringen Kanalbandbreite und der damit verbundenen niedrigen Datenrate kann kein komplettes OFDM-Pilotsymbol zu Synchronisationszwecken benutzt werden. Ebenfalls nötig für eine korrekte Demodulation der Nutzdaten ist eine aktuelle Kanalschätzung des Übertragungskanal.

Erfindungsgemäß wird daher ein Pilotphasenprofil sendeseitig aufgeprägt, so dass empfangsseitig eine Rahmen- und Frequenzsynchronisation möglich ist. Der Einsatz der erfindungsgemäßen Verfahren ist insbesondere für digitale Amplitudenmodulation (AM-Rundfunkübertragung) interessant, da bei diesen Anwendungen die Netto-Bitrate vergleichsweise klein ist.

Figur 1 zeigt ein Blockschaltbild des Gesamtübertragungssystems. Als Datenquellen liegen ein Audiocodierer 1, Zusatzdaten 2 und Steuerdaten 3 vor. Sie werden jeweils durch die Codierer 4, 5 und 6 einer Codierung unterzogen. Die so codierten Audio- und Zusatzdaten werden dann in den Blöcken 8 und 7 zeitlich verwürfelt (Interleaving). Ein Multiplexer 9 fügt dann die Audiodaten, die Zusatzdaten und die Steuerdaten zu einem Datenstrom zusammen, der im Block 10 einem Frequenz-Interleaving und im

Block 11 einer inversen diskreten Fouriertransformation unterzogen wird. Damit wird eine OFDM-Modulation erreicht. Block 11 wird daher auch als OFDM-Modulator bezeichnet. Im OFDM-Modulator 11 werden dem Datenstrom die Piloten mit dem Pilotphasenprofil aus einem Speicher 30 hinzugefügt. Im Block 12 wird dann das so entstandene OFDM-Signal in ein analoges Signal umgesetzt. Im Block 13 wird eine Sendeverstärkung und eine Abstrahlung der Rundfunksignale mit einer Antenne vorgenommen.

Über einen Funkkanal 14 erreicht das OFDM-Signal dann einen Empfänger und zwar in einem Block 15, der eine Antenne und einen Hochfrequenzempfänger aufweist. Die empfangenen Signale werden dann im Analog- Digitalwandler 16 einer Digitalisierung unterzogen. Die so erhaltenen Abtastwerte werden nun im Block 17 einer schnellen Fouriertransformation unterzogen (OFDM-Demodulation). Hier wird auch die erfindungsgemäße Synchronisation durch den Block 18 realisiert. Im Block 19 wird die in den Daten enthaltene Steuerinformation decodiert; während parallel im Block 20 das Entwürfeln, also das Deinterleaving der Audio- und Zusatzdaten vorgenommen wird. Hier wird auch die Programmauswahl aus dem Datenstrom durchgeführt, also beispielsweise welches Rundfunkprogramm vom Nutzer eingestellt wurde. Durch einen Block 21 erfolgt dann die Decodierung der ausgewählten Daten, um im Block 22 eine Audiodecodierung vorzunehmen, so dass dann am Ausgang des Audiodecodierers 22 Audiodaten vorliegen, die mittels eines Lautsprechers und eines Audioverstärkers wiedergegeben werden können.

Den zu übertragenden Daten werden im OFDM-Modulator 11 Piloten hinzugefügt. Diese Piloten dienen zu einer Kanalschätzung des Übertragungskanal 14. Zusätzlich wird nun diesen Piloten ein Phasenprofil aufgeprägt. Dies wird im Folgenden als Pilotphasenprofil bezeichnet. Das

Pilotphasenprofil wird dann empfangsseitig im Block 18 zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation genutzt.

Figur 4 zeigt eine Verteilung der Pilotsymbole in Frequenz- und Zeitrichtung, wobei die Piloten mit 0 gekennzeichnet sind. Bei der Verwendung von kohärenten OFDM-Systemen, wie sie bei DRM eingesetzt werden sollen, ist eine Kanalschätzung mittels Pilotsubträger-Symbolen notwendig, da eine Entzerrung und eine korrekte Demodulation durchgeführt werden muss. Durch eine gleichmäßige Verteilung der Pilotsubträger in Zeit- und Frequenzrichtung wird eine gute Kanalschätzung erreicht. Die Datensubträger sind in Figur 4 mit einem Punkt dargestellt. Im Allgemeinen ist es hinsichtlich einer verlässlichen Kanalschätzung nicht nötig, auf jedem Subträger ein Pilotsymbol zu senden, da sich der Übertragungskanal 14 nur mit einer endlichen Geschwindigkeit ändert. Eine Kanalschätzung für die zwischen zwei Piloten liegenden Subträger wird daher mittels Interpolation erreicht.

Für die Güte einer Kanalschätzung ist es irrelevant, welche Phasen die Pilotsymbole haben. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass der Crestfaktor eines durch Pilotsymbole erzeugten Mehrtronsignals gering ist. Um den Crestfaktor eines Mehrtronsignals gering zu halten, kann folgendes einfaches Phasengesetz verwendet werden (Gleichung 1). Für den k -ten Pilotsubträger im l -ten OFDM-Symbol lässt sich damit schreiben

$$P_{l,p(l,k)} = \sqrt{2} \cdot \tilde{W}_{p(l,k)} = \sqrt{2} \cdot e^{j \frac{\pi \cdot p(l,k)^2}{N_0}}$$

Gleichung 1

mit $p(l,k)$: Index eines Pilotsubträgers im l -ten OFDM-Symbol eines Rahmens
 N_0 : Integerzahl

Es ist zu beachten, daß die Phase der Pilotsubträger lediglich vom Subträgerindex $p(l,k)$ in Gleichung 1 abhängt. Fügt man eine vom Subträgerindex und von der OFDM-Symbol Nummer abhängige zusätzliche Phasenrotation $\varphi_{RND}(l,k)$ zu, so ergibt sich Gleichung 2

$$P_{l,p(l,k)} = \sqrt{2} \cdot W_{p(l,k)} = \sqrt{2} \cdot e^{j \frac{\pi \cdot p(l,k)^2}{N_0}} \cdot e^{j \varphi_{RND}(l,k)}$$

Gleichung 2

Die Phase $\varphi_{RND}(l,k)$ ist hier eine pseudo-zufällige zusätzliche Phasenrotation. Der Wert dieser zusätzlichen Phasenrotation ist vom Subträgerindex k und der OFDM-Symbolnummer l abhängig. Die zusätzlichen Phasenrotationen können in einer Phasenmatrix gespeichert werden.

$$\phi_{RND} |_{N_{FRAME} \times N_{CARRIERS}} = \begin{pmatrix} \varphi_{RND}(1,1) & \varphi_{RND}(1,2) & .. & .. & \varphi_{RND}(1,N_{CARRIERS}) \\ \varphi_{RND}(2,1) & \varphi_{RND}(2,2) & .. & .. & \varphi_{RND}(2,N_{CARRIERS}) \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ \varphi_{RND}(N_{FRAME},1) & .. & .. & .. & \varphi_{RND}(N_{FRAME},N_{CARRIERS}) \end{pmatrix}$$

mit N_{FRAME} : Anzahl der OFDM-Symbole innerhalb eines Rahmens
 $N_{CARRIERS}$: Anzahl der OFDM-Subträger

Die einzelnen Elemente $\varphi_{RND}(l,k)$ können dabei idealerweise von einer Pseudo-Noise-Folge entstammen. Dadurch wird die

größtmögliche Variation zwischen den Pilotphasen unterschiedlicher OFDM-Symbole erreicht. Denkbar ist auch die Verwendung eines einfacheren Phasengesetzes wie in Gleichung 3 beschrieben.

$$\varphi_{RND}(l, k) = \frac{\pi}{N_0} k^2 \cdot l; \quad \Rightarrow \quad P_{l,p(l,k)} = \sqrt{2} \cdot e^{j \frac{\pi \cdot (1+l)}{N_0} \cdot p(l,k)^2}$$

Gleichung 3

Eine weitere Alternative besteht in der Verwendung eines Phasengesetzes nach Gleichung 4:

$$\begin{aligned} \varphi_{RND}(l, p(l, k)) = \varphi_{RND}(l, k_l + ixy) = \arg\{Z(l)\} + 2\pi \cdot xy \cdot \frac{T_G + l \cdot T_S}{T_U} \cdot i \\ + 2\pi \cdot \frac{i^2(1+l)}{P_0} \end{aligned}$$

Gleichung 4

In Gleichung 4 bedeuten

- x : Frequenz-Sub-Sampling-Faktor
- y : Zeit-Sub-Sampling-Faktor
- T_G : Schutzintervall
- T_U : nutzbare Symboldauer
- T_S : OFDM-Symboldauer; $T_S = T_G + T_U$
- k_l : Index des ersten Pilotsubträger im l -ten OFDM-Symbol
- $p(l, k)$: Index eines Pilotsubträgers im l -ten OFDM-Symbol eines Rahmens; $p(l, k) = k_l + ixy$
- P_0 : Konstante
- i : Index
- $\arg\{Z(l, k_l)\}$: Phase des ersten Pilotsubträger im l -ten OFDM-Symbol (= Startphase zur deterministischen Berechnung der übrigen Pilotsubträgerphasen)

Die Phasenwerte $\arg\{Z(l, k_1)\}$ werden als Elemente einer Pseudo-Noise-Folge gewählt.

Wichtig ist, dass durch Hinzufügen einer zusätzlichen Phasenrotation ein innerhalb des Übertragungsrahmen eindeutiges Pilotphasenprofil entsteht. Die exakte Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Pilotphasenprofils spielt für den vorgeschlagenen Synchronisationsalgorithmus eine untergeordnete Rolle. Will man mit dem nachfolgend beschriebenen Algorithmus eine Rahmensynchronisation durchführen, so muß $\varphi_{RND}(l, k)$ eine echte Funktion von l und k sein. Wählt man hingegen $\varphi_{RND}(l, k) = f(l)$ oder $\varphi_{RND}(l, k) = f(l) + f(s)$, so ist mit dem nachfolgend beschriebenen Algorithmus nur eine Ermittlung der groben Frequenzablage möglich. Für eine Rahmensynchronisation aus der verteilten Pilotanordnung müssen die Pilotphasen verschiedener OFDM-Symbole hinreichend verschieden sein, oder - mathematisch ausgedrückt - $\varphi_{RND}(l, k) = f(l, k)$ muß also eine echte Funktion von Subträgerindex k und OFDM-Symbolnummer l sein. Weiterhin wichtig ist, dass $\varphi_{RND}(l, k) = \varphi_{RND}(l + N_{FRAME}, k)$ gilt. Generell gilt, je "zufälliger" die Pilotphasen gewählt werden, desto mehr Möglichkeiten eröffnen sich für einen Synchronisationsalgorithmus.

Im folgenden wird gezeigt, wie ein eindeutiges Pilotphasenprofil sowohl zur Rahmensynchronisation als auch zur Ermittlung der groben Frequenzablage bei einem kohärenten OFDM-System verwendet werden kann. Zusätzliche Redundanz zur Rahmensynchronisation wird durch dieses Verfahren vermieden.

Bevor der vorgeschlagene Synchronisationsalgorithmus angewendet werden kann, muß eine grobe Zeitsynchronisation zur Platzierung des DFT-(Demodulations-)Fensters durchgeführt werden. Eine grobe Zeitsynchronisation kann mittels Berechnung der Korrelation von Teilen des Guard-Intervalls mit dem entsprechenden Abschnitt am

Ende des nutzbaren OFDM-Symbols erreicht werden. Es ist bekannt, dass mit dem gleichen Verfahren ebenfalls eine Schätzung der feinen Frequenzablage ($\pm 0.5 \cdot 1/T_U$) ermittelt werden kann. Unbekannt, aber für eine korrekte Demodulation der Nutzdaten unerlässlich, sind jetzt noch eine Detektion der groben Frequenzablage (ganzzahlige Vielfache des Subträgerabstands $1/T_U$) und des Rahmenanfangs. Diese können mit folgendem Verfahren ermittelt werden.

Ausgangspunkt zur Ermittlung der groben Frequenzablage und des Rahmenanfangs ist die Berechnung einer Kreuzkorrelation zwischen den empfangenen Subträgersymbolen $R(l, k)$ mit der Pilotphasensequenz $W(l, p(l, k))$. Die Berechnungsvorschrift nach Gleichung 5 wird im Folgenden Pilotphasenmetrik genannt. Voraussetzung für die Anwendung der Pilotphasenmetrik ist, dass der Beginn des OFDM-Demodulationsfensters im intersymbolinterferenzfreien (ISI-freien) Bereich des Schutzintervalls liegt.

$$\Lambda(l, p(l, k), s, i) = ABS \left[\sum_k W^*(l, p(l, k)) \cdot W(l, p(l, k+1)) \cdot R(s, p(l, k) + i) \cdot R^*(s, p(l, k+1) + i) \right]$$

Gleichung 5

In Gleichung 5 bedeuten

- l : OFDM-Symbolnummer innerhalb eines Rahmens
- $p(l, k)$: Index eines Pilotsubträgers im l -ten OFDM-Symbol eines Rahmens
- i : Probierposition zur Ermittlung der groben Frequenzablage
(Index i läuft in Frequenzrichtung)
- s : Probierposition zur Ermittlung des Rahmenanfangssymbols (Index s läuft in Zeitrichtung)
- ABS : Absolutwert

$R(l,k)$: k -tes Subträgersymbol im l -ten OFDM-Symbol

Gleichung 5 liefert dann einen maximalen Wert, wenn die Pilotphasensequenz $W(l,p(l,k))$ mit der empfangenen Subträgersequenz $R(s,p(l,k)+i)$ übereinstimmt. In allen anderen Fällen nimmt die Pilotphasenmetrik bei Verwendung eines Pseudo-Noise-Phasenprofils auf Grund des Pseudo-Noise-Charakters der Phasensequenz einen kleinen Wert an. Figur 5 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Zur Ermittlung der groben Frequenzablage ist Gleichung 5 für mehrere Probierpositionen i zu berechnen.

Wird hingegen ein deterministisches Pilotphasenprofil nach Gleichung 3 oder Gleichung 4 verwendet, so wird die Pilotphasenmetrik mit dem Pilotabstand periodisch. In diesem Fall ist mit Gleichung 5 nur eine Ermittlung des Rahmenanfangs möglich. Der Fangbereich zur Ermittlung der groben Frequenzablage ist durch den Abstand der Pilotsubträger Δf eingeschränkt.

Ist sogar eine exakte Zeitsynchronisation bekannt, so kann alternativ zum Auffinden des groben Frequenzversatzes und des Rahmenanfangs Gleichung 6 verwendet werden. Im Vergleich zu Gleichung 5 wird hier direkt die Kreuzkorrelation zwischen der Pilotphasensequenz $W(l,p(l,k))$ und den empfangenen Subträgersymbolen berechnet.

$$\Lambda(l,p(l,k),s,i) = ABS \left[\sum_k W^*(l,p(l,k)) \cdot R(s,p(l,k)+i) \right]$$

Gleichung 6

Mit Gleichung 6 ist eine eindeutige Ermittlung des groben Frequenzversatzes sowohl mit einem Pseudo-Noise-Phasenprofil oder einem deterministischen Phasenprofil nach Gleichung 3 oder Gleichung 4 möglich.

Um eine Rahmensynchronisation zu erreichen, kann man einerseits die empfangenen Subträgersymbole mit allen möglichen Pilotphasensequenzen eines Rahmens korrelieren oder andersherum eine Pilotphasensequenz mit allen empfangenen Subträgersymbolen korrelieren.

Zur Verbesserung der Schätzergebnisse kann nicht nur nach einem bestimmten Pilotphasenprofil $W(l, p(l, k))$ gesucht werden, sondern auch gleich nach mehreren; denn nach Gleichung 3 ist das Pilotphasenprofil für jedes OFDM-Symbol eines Rahmens eindeutig. Mathematisch bedeutet dies eine Mittelung der Metrikergebnisse $\Lambda(l, p(l, k), s, i)$ aus Gleichung 5:

$$\bar{\Lambda}(s, i) = \sum_{l=1}^{nb} \Lambda(l, p(l, k), s, i)$$

Gleichung 7

mit

nb : Anzahl der OFDM-Symbole, über die gemittelt wird (1.. N_{FRAME})

Zur Beurteilung der Matrixelemente $\bar{\Lambda}(s, \hat{i}_s)$ lassen sich verschiedene Korrelationsgütemaße definieren, wie zum Beispiel das HNV , welches das Verhältnis des Hauptmaximums $\bar{\Lambda}(s, \hat{i}_s)$ an der Stelle \hat{i}_s der Pilotphasenmetrik zum betragsgrößten Nebenmaximum angibt. Das HNV ist für alle möglichen Positionen des Rahmenanfangs zu berechnen (also insgesamt N_{FRAME} mal).

$$HNV(s, \hat{i}_s) = \frac{\bar{\Lambda}(s, \hat{i}_s)}{\max_i \{ \bar{\Lambda}(s, i) \} |_{i \neq \hat{i}_s}}$$

Gleichung 8

Figur 6 zeigt die *HNV*-Werte für 4 DRM-Rahmen. Das Rahmenanfangssymbol ist jeweils deutlich zu erkennen. Eine Maximumdetektion von *HNV* liefert:

$$HNV_{\max}(s_{\max}, i_{\max}) = \max_s \{HNV(s, \hat{i}_s)\}$$

Gleichung 9

Die Indizes s_{\max} und i_{\max} in Gleichung 9 des maximalen *HNV* geben die Position des Rahmenanfangssymbols bzw. die grobe Frequenzablage an. Analog zum *HNV* kann man als Korrelationsgütemaß auch den Meritfaktor (*MF*) benutzen. Der Meritfaktor beschreibt das Verhältnis der Energie des Hauptwertes der Pilotphasenmetrik $\bar{\Lambda}^2(s, \hat{i}_s)$ zur gesamten in den Nebenwerten enthaltenen Energie. Der Auswertealgorithmus zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation lautet dann:

$$MF(s, \hat{i}) = \frac{\bar{\Lambda}^2(s, \hat{i}_s)}{\sum_{\substack{i \\ i \neq \hat{i}_s}} |\bar{\Lambda}(s, i)|^2}$$

Gleichung 10

Eine Maximumdetektion von *MF* liefert:

$$MF_{\max}(s_{\max}, i_{\max}) = \max_s \{MF(s, \hat{i}_s)\}$$

Gleichung 11

Auch hier geben die Indizes s_{\max} und i_{\max} des maximalen *MF* das Rahmenanfangssymbol bzw. die grobe Frequenzablage an. Der maximale Fangbereich der Pilotphasenmetrik wird durch die Anzahl der im Auswertebereich vorhandenen Pilotschtragersymbole

bestimmt. Bei Verwendung von Pilotanordnungen nach Figur 4 kann der Fangbereich mehr als eine halbe DFT-Länge betragen.

Figur 2 zeigt nun als Blockschaltbild das erfindungsgemäße Verfahren das im Empfänger abläuft. Die Abtastwerte des Empfangssignals r , die durch den Analog-Digitalwandler 16 gewonnen wurden, werden einer Zeitsynchronisationseinheit 27 und einem OFDM-Demodulator (= DFT-Einheit) 28 zugeführt. Die Zeitsynchronisationseinheit 27 führt eine grobe Zeitsynchronisation anhand des im Empfangssignal enthaltenen Schutzintervalls durch. Genauer gesagt wird mittels Berechnung einer Autokorrelation der Beginn des Schutzintervalls und damit der Beginn eines OFDM-Symbols gesucht.

Die mit dem OFDM-Demodulator 28 demodulierten Daten $R(l,k)$ werden dann einer Berechnung der Pilotphasenmetrik in einem Prozessor 29 zugeführt. Der sich daraus ergebene Wert Λ wird einer Mittelwertbildung über eine vorgegebene Anzahl von OFDM-Symbolen zugeführt, um einen Mittelwert für Λ zu berechnen. Auch dies wird im Prozessor 29 durchgeführt. Dann folgt entweder eine Bewertung dieses Korrelationswertes $\bar{\Lambda}$ mit einem Haupt-Nebenmaximum-Verhältnis oder wie oben dargestellt mit einem Meritfaktor, wobei auch diese Bewertung im Prozessor 29 ausgeführt wird.

Die Indizes des so berechneten Maximalwertes des Korrelationsgütemaßes geben die Position des Rahmenanfangssymbols bzw. die grobe Frequenzablage an. Mit anderen Worten liegt am Ausgang des Prozessors 29 als Ergebnis der Frequenzversatz in ganzzahligen Vielfachen des Subträgerfrequenzabstands vor, und das Rahmenanfangssymbol ist bei der Detektion des Maximalwerts gefunden. Der Empfänger sucht also mit einem abgespeicherten Pilotphasenprofil die empfangenen Subträgersymbole Wert für

Wert ab. Ist eine größtmögliche Übereinstimmung zwischen abgespeicherten Pilotphasenprofil und empfangenen Pilotphasenprofil erreicht, dann ist der Rahmenanfang gefunden und der grobe Frequenzversatz detektiert.

Figur 3 zeigt als Flussdiagramm das erfindungsgemäße Verfahren, das im Sender abläuft. In einem ersten Verfahrensschritt 23 werden die Piloten und die zu übertragenden Nutzsymbole auf ein OFDM-Symbol abgebildet. Gleichzeitig wird den Piloten das eindeutige Pilotphasenprofil aufgeprägt (Verfahrensschritt 24). Das so entstandene OFDM-Symbol wird dann dem OFDM-Modulator 10 und 11 zugeführt (Verfahrensschritt 25), um ein OFDM-Signal zu erzeugen. Des weiteren wird im dem OFDM-Signal noch ein Schutzintervall zugefügt. Im Block 13 wird das OFDM-Signal versendet (Verfahrensschritt 26).

Ansprüche

1. Verfahren zur Rahmen- und Frequenzsynchronisation eines OFDM (Orthogonaler Frequenzmultiplex)- Signals, wobei mit dem OFDM-Signal OFDM-Symbole, die jeweils Subträgersymbole aufweisen, empfangen werden, dadurch gekennzeichnet, dass die empfangenen Subträgersymbole mit wenigstens einem abgespeicherten Pilotphasenprofil verglichen werden und dass in Abhängigkeit von dem Vergleich die Rahmen- und Frequenzsynchronisation des OFDM-Signals durchgeführt wird.
2. Verfahren zum Senden eines OFDM-Signals, wobei mit dem OFDM-Signal OFDM-Symbole gesendet werden, denen jeweils ein Schutzintervall zugefügt wurde und die jeweils Subträgersymbole aufweisen, wobei vorgegebene Subträgersymbole als Piloten gesendet werden, dadurch gekennzeichnet, dass den Piloten jeweils eine jeweilige Phase vor dem Senden aufgeprägt wird, so dass sich wenigstens ein Pilotphasenprofil ergibt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass vor dem Vergleich der empfangenen Subträgersymbole mit dem abgespeicherten Pilotphasenprofil eine grobe Zeitsynchronisation durch eine Suche nach dem Schutzintervall in den empfangenen OFDM-Signal durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Vergleich durch eine Kreuzkorrelation durchgeführt wird und die Kreuzkorrelation dann für die Bestimmung der Rahmen- und Frequenzsynchronisation bewertet wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Vergleich nach folgender Gleichung durchgeführt wird:

$$\Lambda(l, p(l, k), s, i) = ABS \left[\sum_k W^*(l, p(l, k)) \cdot W(l, p(l, k+1)) \cdot R(s, p(l, k) + i) \cdot R^*(s, p(l, k+1) + i) \right]$$

6. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Pilotphasenprofil durch eine Gleichung oder eine Pseudo- Zufallsfolge bestimmt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichung

$$P_{l, p(l, k)} = \sqrt{2} \cdot W_{p(l, k)} = \sqrt{2} \cdot e^{j \frac{\pi \cdot p(l, k)^2}{N_0}} \cdot e^{j \varphi_{RND}(l, k)}$$

lautet.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichung

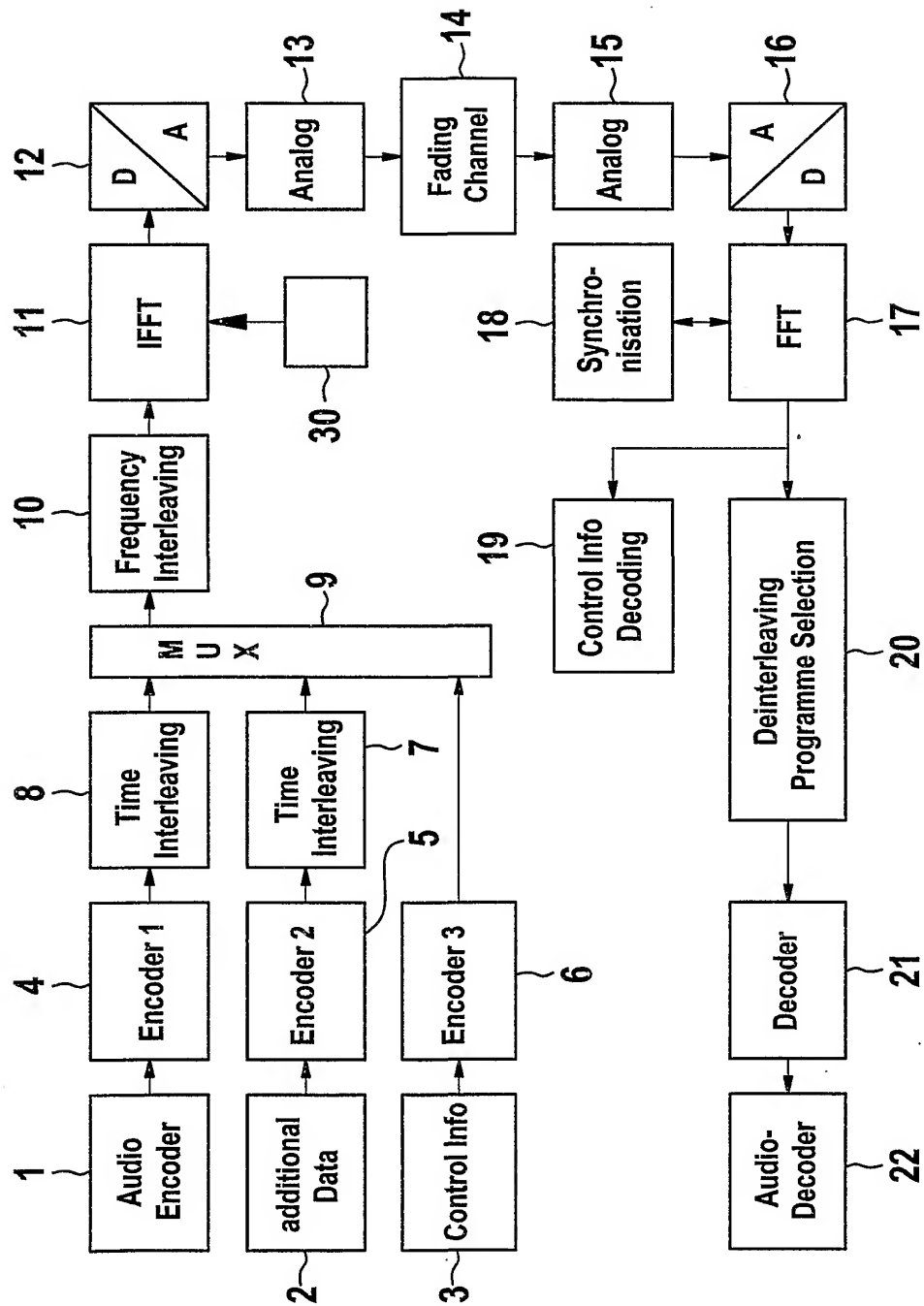
$$\begin{aligned} \varphi_{RND}(l, p(l, k)) = \varphi_{RND}(l, k_l + ixy) = \arg\{Z(l)\} + 2\pi \cdot xy \cdot \frac{T_G + l \cdot T_S}{T_U} \cdot i \\ + 2\pi \cdot \frac{i^2(1+l)}{P_0} \end{aligned}$$

lautet.

9. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Piloten gleichmäßig in einem OFDM-Symbol verteilt werden.
10. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bewertung der Kreuzkorrelation ein Haupt-Nebenmaximum-Verhältnis verwendet wird.
11. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass ein Meritfaktor zur Bewertung der Kreuzkorrelation verwendet wird.
12. Sender zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2, 3, 6, 7, 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Sender einen Speicher (30) mit dem Pilotphasenprofil, einen OFDM-Modulator (10, 11) eine Antenne (12) zum Versenden des OFDM-Signals und eine Vorrichtung zur Einspeisung (11) der Piloten mit dem Pilotphasenprofil aufweist.
13. Empfänger zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1, 3, 4, 5, 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Empfänger eine erste Zeitsynchronisationseinheit (18, 27) für die grobe Zeitsynchronisation, einen OFDM-Demodulator (17, 28) und einen Prozessor (29) mit Speicher zur Durchführung des Vergleichs zwischen den empfangenen Subträgersymbolen und dem abgespeicherten Pilotphasenprofil aufweist.

1 / 5

Fig. 1



2 / 5

Fig. 2

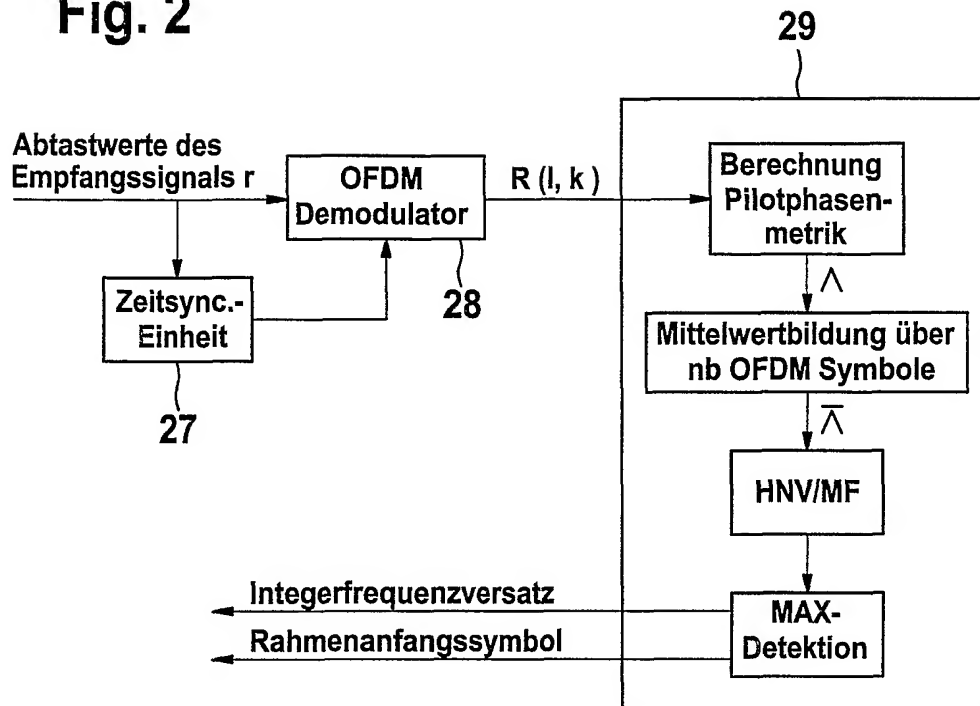
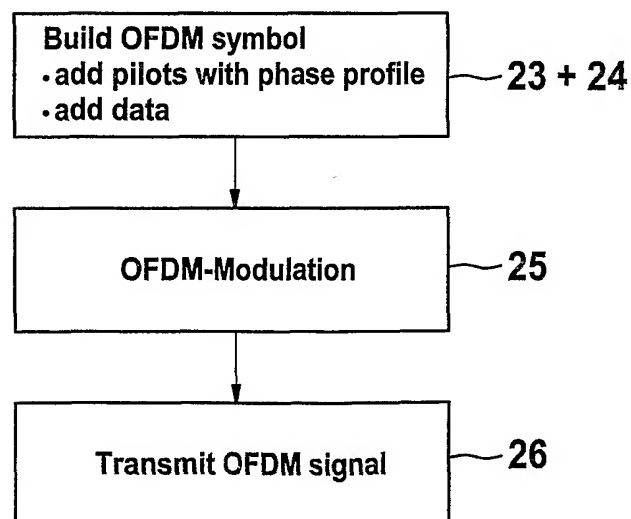
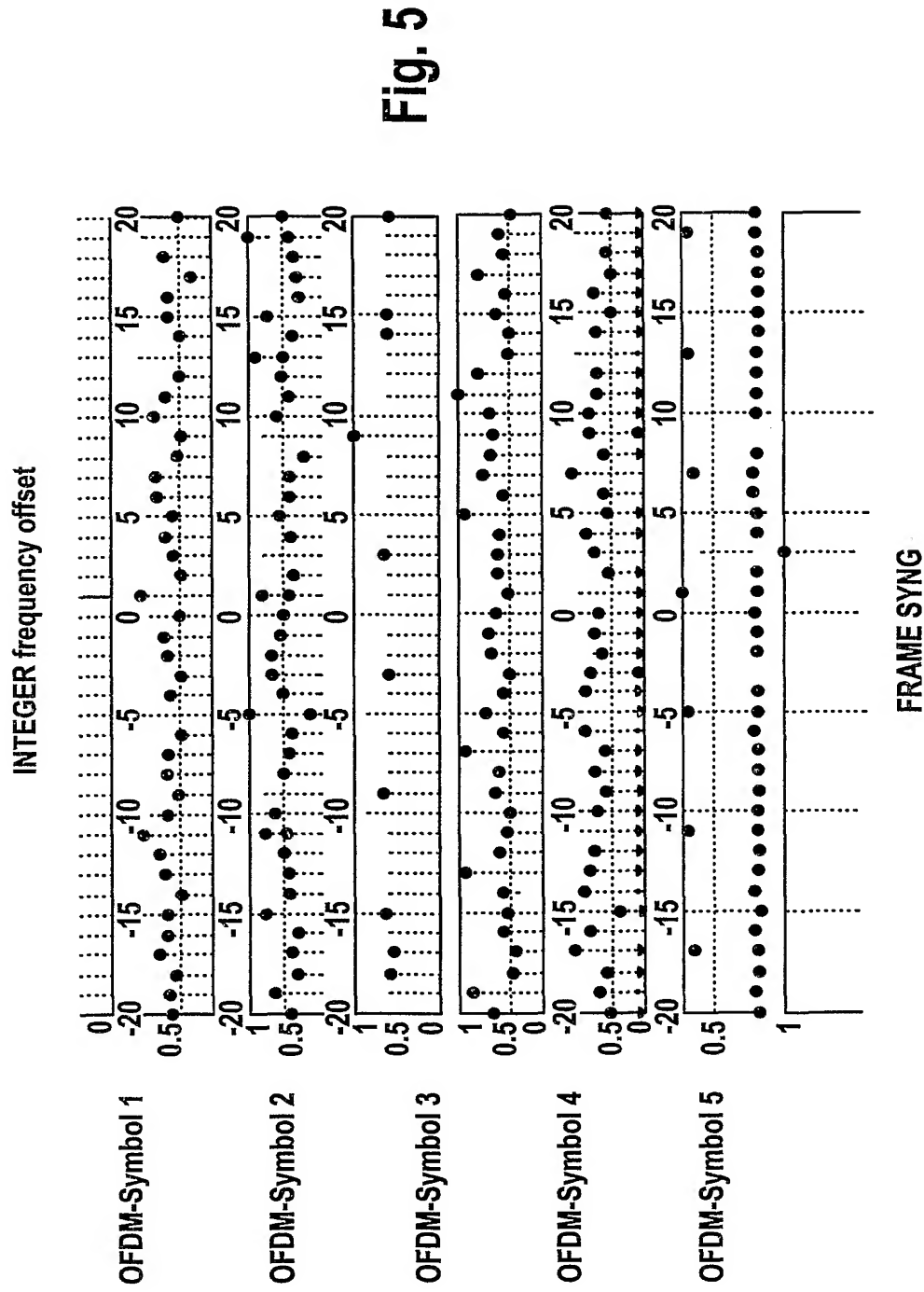


Fig. 3



4 / 5



5 / 5

Fig. 6

